乌海矿区几种典型尘源物质的风蚀特征①

李雨珂[1]， 辛智鸣[2]， 肖辉杰[1]， 张明浩[1]， 卢斯琦[1]， 王 露[1]
（1. 北京林业大学水土保持学院水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室，北京 100083；
2. 中国林业科学研究院沙漠林业实验中心，内蒙古 磴口 015200）

摘 要：内蒙古乌海市矿区沙（粉）尘污染严重，测定该地区典型尘源物质的起动风速、风蚀率，对研究该地区近地表输沙率、风蚀量预测与沙尘天气预报有重要作用。本研究以裸沙、壤质砂土、粉煤灰、焦煤、煤矸石5种典型尘源物质为对象，通过风洞试验测定其起动风速、风蚀率，通过室内实验测定尘源物质的容重、粒径分布，分析各因素对其影响，并研究含水率变化与风蚀特征之间的关系。结果显示：① 尘源物质起动风速依次为：裸沙＞壤质砂土＞焦煤＞煤矸石＞粉煤灰；裸沙风蚀率随风速呈线性增长趋势，壤质砂土、粉煤灰、焦煤呈幂函数增长趋势，煤矸石增长趋势接近于指数函数；② 尘源物质粒度组成相差较大情况下，较轻的物质更易起动，粒度组成相近情况下，粒径分布、中值粒径较小、难蚀颗粒分布频率高的物质抗蚀性更大；③ 裸沙、焦煤、煤矸石的起动风速与含水率呈正幂函数关系，壤质砂土、粉煤灰在含水率2%～4%、1.46%～4.16%时起动风速无明显变化；裸沙、焦煤、煤矸石的含水阈值在3%、4%、饱和含水率左右，壤质砂土、粉煤灰风蚀率与含水率呈负指数关系；④ 焦煤、煤矸石可通过提高含水率抑制风蚀，裸沙、壤质砂土、粉煤灰需结合环境与影响因素之间的关系合理布置防治措施。

关键词：起动风速；风蚀率；容重；粒径；含水率；乌海矿区

我国西北干旱荒漠区煤炭基地风沙、粉尘污染问题严重，是近年备受关注的环境问题[1]。内蒙古乌海市西邻乌兰布和沙漠是西北干旱区重要的煤炭基地，影响该地区空气污染的主要因素为气象条件、沙漠地形及污染物排放[2-3]。对风沙、粉尘污染发生过程及防治进行研究，首先需对该地区典型的尘源物质风蚀及其影响因素进行试验。

风蚀是指在风力作用下土壤或土壤母质发生位移，土壤结构遭到破坏、物质损失的过程。地表物质的起动是风蚀发生的首要环节[4]，风沙物理学中将颗粒开始运动的风速临界值定义为临界起动风速[5]，将单位时间单位面积所产生的风蚀量用风蚀率表示[6]。风蚀的发生及发展取决于侵蚀因子与可蚀性因子之间的相互作用，尘源物质的物理性质属于可蚀性因子[7]，而裸沙、土壤、煤堆和矸石等颗粒的风蚀量与颗粒粒度、容重、含水量和外界风速等因素有关[8-10]。Bagnold研究表明，颗粒的粒径对起动风速大小影响显著[11]，粒径＞0.84 mm的颗粒为不可蚀颗粒，粒径≤0.84 mm颗粒为可蚀性颗粒，粒径0.05～0.50 mm的颗粒为最易蚀性颗粒[12-13]。影响风蚀的因素是多方面的，水分会增加颗粒间的内聚力，从而提升土壤的抗风蚀性[14-15]。

以往针对单一尘源物质进行研究，且对砂粒、土壤研究较多，对其他的尘源物质研究较少[16]。本研究对乌海矿区几种典型尘源物质进行统一标准试验，研究相同环境条件下几种尘源物质的风蚀特征，探究不同因素对其风蚀特征的影响，并对比不同尘源物质风蚀特征、影响因素的共性与差异，为乌海矿区产生粉尘污染的典型尘源物质风蚀防治方法研究、污染区域防治措施布设提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

内蒙古乌海市位于乌兰布和沙漠东部，地处黄河上游。气候干旱、多风，年降水量仅160～180 mm，年蒸发量3 000 mm。年平均风速3.1～4.7 $m\cdot s^{-1}$，最大风速为28 $m\cdot s^{-1}$，大风多集中在4—10月。该地区土壤多为沙质或第四纪冲积物，结构松散。植被稀疏，植被覆盖率为5%～10%，主要植

① **收稿日期：**2019-05-27； **修订日期：**2019-11-20
基金项目：国家重点研发计划项目“西北干旱荒漠区煤炭基地生态安全保障技术”（2017YFC0504400）资助
作者简介：李雨珂（1993-），女，硕士，研究方向为水土保持与荒漠化防治. E-mail：vickyli623@outlook.com
通讯作者：肖辉杰. E-mail：herr_xiao@hotmail.com

物资源有四合木(*Tetraena mongolica* Maxim.)、蒙古沙拐枣(*Calligonum mongolicm* Turcz.)、胡杨(*Populus euphratica* Oliv.)等[13]。乌海市境内多山,在贺兰山余脉与巴彦淖尔境内的阴山余脉之间形成了长达40 km的风口,乌海处于沙漠前沿迎风位置,是沙尘暴和沙质荒漠化的主要源头[17]。

乌海市因煤炭开发利用而立市,辖区煤炭资源丰富,分布集中。煤矿采场、矸土排放场、尾矿库都是矿区粉尘污染严重的地带[18]。该地区矸土排放场采用黄土覆盖作为灭火及生态恢复措施,暂时裸露堆放的黄土在干旱多风条件下易发生风蚀。同时,火电厂用煤产生的大量粉煤灰堆放在矿区内,不仅占用土地,还极易产生粉尘污染。

1.2 试验材料

本研究选择乌海市境内裸沙、壤质砂土、粉煤灰、焦煤、煤矸石等5种典型尘源物质进行试验。分别从乌兰布和沙漠、摩尔沟矸土排放场已覆盖黄土区域、乌海市新星矿区矸土排放场、矿区内堆煤场、灰场采集试验样品。使用环刀、铝盒、自封袋进行采样,每种尘源物质设置3组重复,用于测定样品的物理性质;从尘源物质表层0~10 cm取样,用于风洞试验。

根据尘源物质的粒径分布判定,土壤质地为壤质砂土(国际制),土壤黏粒含量较低,难以形成稳定的土壤结构。5种尘源物质的黏粒及粉粒含量为:粉煤灰>焦煤>煤矸石>裸沙>壤质砂土;粉煤灰粒径分布以粉粒为主,含量为38.67%;裸沙和壤质砂土结构相似,细砂粒最多,分别为54.51%、41.65%;焦煤和煤矸石两种尘源物质结构相似,极细砂粒、细砂粒含量所占比例较小,极细砂粒含量分别为5.53%、3.56%,细砂粒含量仅占1.64%、2.65%(表1)。

表1 尘源物质的粒径分布

Tab.1 Particle size distribution of dust source materials

类型	黏粒/%	粉粒/%	极细砂粒/%	细砂粒/%	中砂粒/%	粗砂粒/%	砂粒/%
裸沙	1.01	10.25	14.06	54.51	18.89	0.68	0.60
壤质砂土	0.85	3.16	6.86	41.65	23.16	19.57	4.75
粉煤灰	4.03	38.67	19.53	22.20	13.07	1.59	0.89
焦煤	3.89	23.70	5.53	1.64	20.84	23.66	20.74
煤矸石	2.18	17.34	3.56	2.65	17.81	25.39	31.07

室内分析测定尘源物质的物理性质,粉煤灰容重最小,壤质砂土的容重最大;裸沙和壤质砂土容重较为接近,焦煤和煤矸石容重较为接近。粉煤灰的自然含水率和饱和含水率最大,且显著大于其他物质,焦煤、煤矸石的饱和含水率较小(表2)。

表2 尘源物质的物理性质

Tab.2 Physical properties of dust source materials

类型	容重/($g\cdot cm^{-3}$)	自然含水率/%	饱和含水率/%
裸沙	1.51	0.66	28.30
壤质砂土	1.60	0.53	23.99
粉煤灰	0.86	2.22	69.69
焦煤	1.22	1.09	8.77
煤矸石	1.31	0.67	6.87

1.3 试验方法

在内蒙古磴口县中国林业科学研究院沙漠林业实验中心、北京林业大学水土保持与荒漠化防治实验室进行室内分析,测定尘源物质的物理性质。采用环刀法测定尘源物质的容重、烘干法测定含水率,使用Mastersizer 3000激光粒度分析仪测定其粒径分布,每项指标3组重复。

在中国林业科学院沙漠林业实验中心进行风洞试验,该风洞全长20 m,前3 m为紊流段,试验段截面面积为2.0 m×2.0 m,试验风速2~12 $m\cdot s^{-1}$。调节风洞电机频率改变风洞风速,将毕托管放置在100 cm高度处测量实时风速。试验材料用长70 cm宽50 cm厚度为5 cm的钢槽装盛,将钢槽放置于距出口2 m处,钢槽放置的试验区域内下垫面稳定不发生风蚀。使用目测法较难观测颗粒移动,将3根宽度2 cm木棍涂上凡士林放置于样品后方,从风速3 $m\cdot s^{-1}$对应频率由小到大调试风洞电机频率,当木棍沾到被吹蚀的颗粒物时读取毕托管实时风速。

根据各尘源物质的自然含水率与饱和含水率,分别设计5个含水率梯度,以自然含水率为起点、尘源物质饱和含水率为终点。通过预试验发现裸沙、黄土、粉煤灰在到达饱和含水率前已基本不发生风

蚀,故减小这 3 种物质试验含水率的最大值,对其含水率梯度进行调整。

风蚀量为每次吹蚀试验前后钢槽中样品的质量差,根据吹蚀时间及钢槽的面积计算得到风蚀率,单位为 $g \cdot m^{-2} \cdot min^{-1}$。试验过程中样品水分蒸发较快,风洞试验前后含水率会发生变化,每次风洞试验结束后在不同尘源物质表层取样,测定样品实际含水率,取 3 组重复,以平均值作为风洞试验的样品含水率。

1.4 数据分析

绘制粒径分布频率曲线,横坐标为 Φ 值。根据 Udden-Wentworth 粒径标准,通过 Krumbein 所提出的对数转化法,将粒度的真值转化为 Φ 值[19]:

$$\Phi = -\log_2 d \quad (1)$$

式中:d 为砂粒粒径,mm 。使用 SPSS Statistic 19 软件,通过最小显著差异法(LSD)对各尘源物质的物理性质进行差异显著性分析,置信区间为 95% 。使用 R-3.4.2 对各影响因素与起动风速进行回归分析。

2 结果与分析

2.1 尘源物质的风蚀特征

2.1.1 起动风速 自然风干状态下测定 5 种尘源物质的起动风速(表 3)。裸沙的起动风速高于其他尘源物质,最难发生风蚀;其次是壤质砂土;焦煤在 5 $m \cdot s^{-1}$左右较低风速下会发生风蚀;煤矸石起动风速小于焦煤;粉煤灰的起动风速最小,在轻微的扰动下粉煤灰颗粒便会起动。

表 3 尘源物质的起动风速

Tab. 3 Threshold velocity of dust source materials

类型	起动风速/($m \cdot s^{-1}$)
裸沙	6.40
壤质砂土	5.31
粉煤灰	3.89
焦煤	5.02
煤矸石	4.41

2.1.2 风蚀率 自然含水率下,尘源物质的风蚀率随风速的增大而增加(图 1)。裸沙的风蚀率与风速呈线性正相关(R^2 =0.99),在试验风速范围内其风蚀率增速随风速变化不明显;壤质砂土、粉煤灰、焦煤风蚀率随风速呈幂函数关系增长(R^2 >0.95),风蚀率的增速随风速增大而增大;煤矸石的风蚀率随风速变化接近于指数函数关系(R^2 =0.95),风蚀率增速略大于焦煤。在试验风速小于 10 $m \cdot s^{-1}$时,壤质砂土的风蚀率小于粉煤灰,但壤质砂土风速率随风速的增大速度大于粉煤灰,在试验风速超过 10 $m \cdot s^{-1}$后壤质砂土的风蚀率超过粉煤灰。

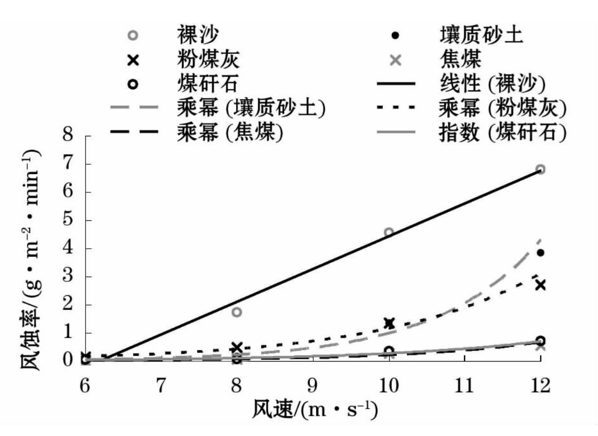


图 1 尘源物质风蚀率与风速的关系

Fig. 1 Relationships between wind erosion rate of dust source materials and wind speed

2.2 不同含水率下尘源物质的风蚀特征

2.2.1 起动风速 尘源物质起动风速与含水率之间的关系如图 2 所示,试验样品类型依次为裸沙、壤质砂土、粉煤灰、焦煤、煤矸石。裸沙的自然含水量为 0.66% ,起动风速与含水率呈正幂函数关系(R^2 = 0.99);壤质砂土含水率在 <1.46% 、>4.16% 时起动风速随含水率的增加而增大,而含水率在 1.46% ~4.16% 内起动风速变化不明显;粉煤灰的自然含水率为 2.22% ,高于其他物质,饱和含水率也明显高于其他尘源物质,在含水率 <7.11% 和 >12.97% 时粉煤灰的起动风速都随含水率的增加而增大,含水率在 7.11% ~12.97% 时起动风速随含水率变化不明显,粉煤灰对含水率变化敏感度最低,起动风速随含水量增加其趋势接近正幂函数关系(R^2 =0.92);焦煤的起动风速与含水率呈二次函数关系(R^2 = 0.96),自然含水率为 1.09% ,含水率 <5.93% 焦煤的起动风速缓慢增加,而含水率 >5.93% 时起动风速随含水率增加而迅速增加;煤矸石的自然含水率为 0.67% ,起动风速与含水率呈正幂函数关系(R^2 =0.96)。5 种尘源物质的起动风速均随含水率的增加而增大。

2.2.2 风蚀率 在 4 种试验风速下 5 种尘源物质风蚀率随含水率变化如图 3 所示。裸沙在 8 $m \cdot s^{-1}$风速下风蚀率与含水率变化呈正幂函数关系(R^2 = 0.98),在大于 8 $m \cdot s^{-1}$较高风速下变化趋势接近

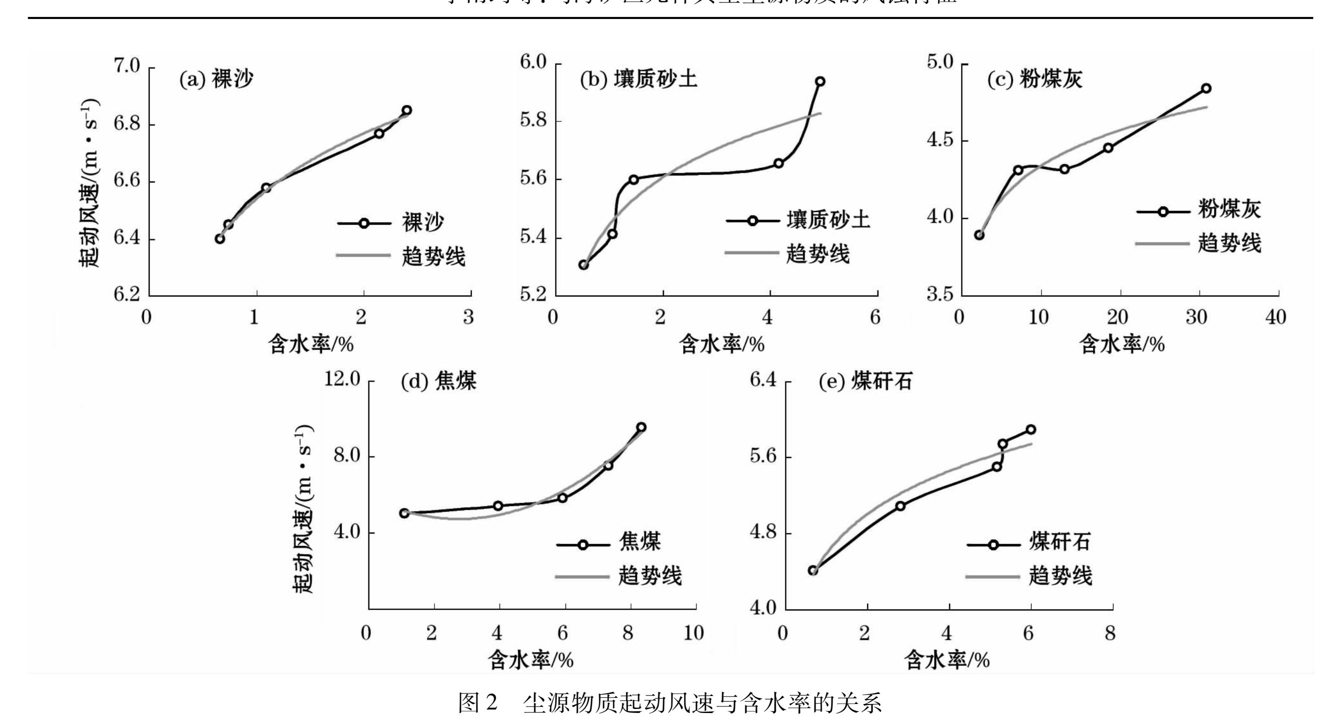


图 2　尘源物质起动风速与含水率的关系

Fig. 2　Relationships between the threshold velocity of dust source materials and water Content

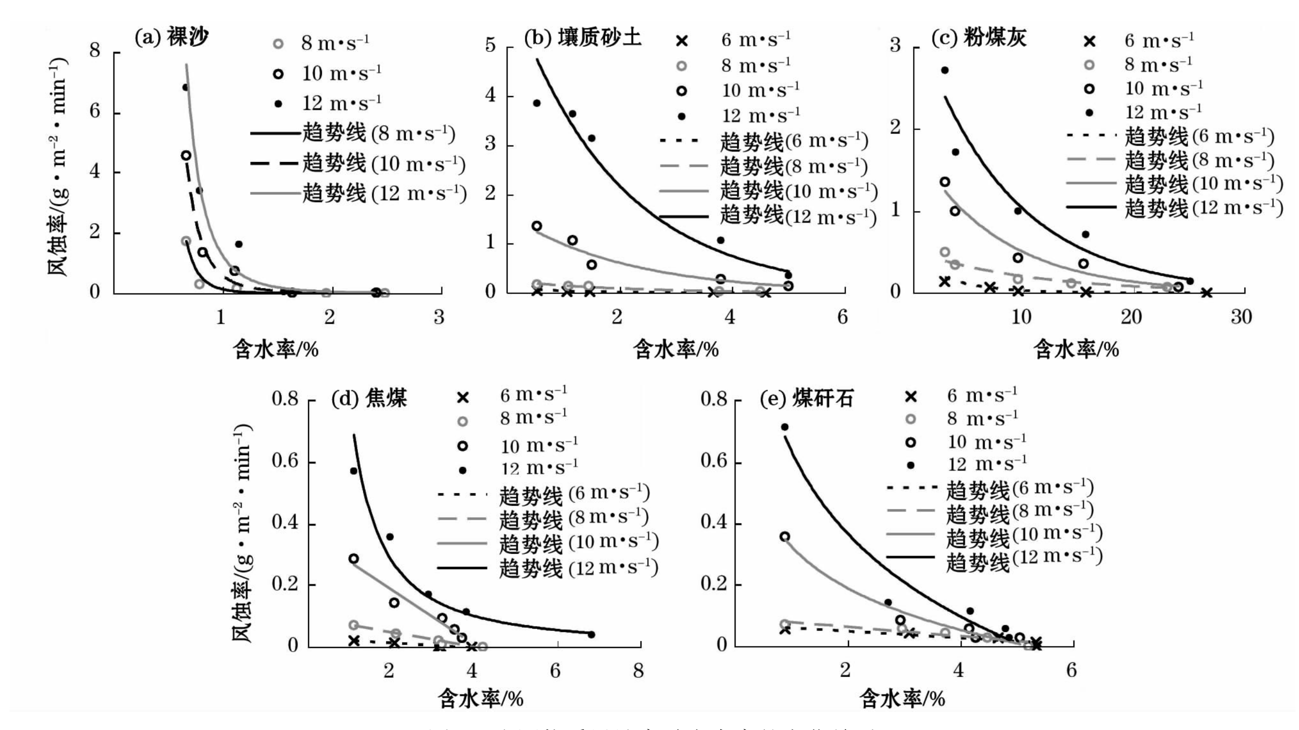


图 3　尘源物质风蚀率随含水率的变化关系

Fig. 3　Relationships between wind erosion rate and moisture content of dust source materials

于正幂函数关系,各风速下当含水率从自然含水率增加到 1% 风蚀率迅速下降,含水率大于 1% 后风蚀率减小速度变缓,裸沙在含水率 3% 左右时可以抵御 12 m·s^{-1}大风;壤质砂土、粉煤灰各风速下风蚀率随含水率呈负指数变化(R^2 >0.95),两种物质对含水率变化敏感度比裸沙低;壤质砂土含水率达到 5% 左右可以抵御 8 m·s^{-1}以下风速风蚀,到达饱和含水率可以有效减小较大风速造成的风蚀;粉煤灰含水率小于 10% 时,对 12 m·s^{-1}风速造成的风蚀抑制效果不明显,含水率大于 10% 后风蚀率随含水率增加而减小;在 12 m·s^{-1}风速下,焦煤的风蚀率与含水率呈负幂函数关系(R^2 =0.98),6、8、10 m·s^{-1}风蚀率与含水率呈线性负相关(R^2 >0.95),且含水率在 4% 左右时风速 10 m·s^{-1}以下风蚀得

到有效抑制；在 10、12 m · s^{-1}较大风速下，煤矸石的风蚀率与含水率呈负对数关系（$R^2>0.95$），较小风速下风蚀率与含水率接近于线性负相关，在达到饱和含水率时几乎不发生风蚀。

3 讨 论

3.1 不同物质的风蚀特征差异及其原因分析

尘源物质的风蚀特征受到容重的影响，容重小的尘源物质单位容积内物体的重量小，易被吹起，粉煤灰容重最小且远小于其他 4 种物质，起动风速最小。对其他 4 种尘源物质的粒径进行分析（图 4），粒径累积达到 50% 所对应的粒径为尘源物质的中值粒径[20]，煤矸石中值粒径最大，其次是焦煤，壤质砂土的中值粒径大于裸沙，粉煤灰的中值粒径最小。通过计算得到本试验裸沙和壤质砂土的中值粒径为 0.125、0.175 mm，起动风速分别为 5.6、6.6 m · s^{-1}，与杨具瑞等[21]均匀沙测定起动风速相近。中值粒径为 0.050 mm 的焦煤临界起动风速 5.0 m · s^{-1}，起动风速与 Cabrejos 等[22]研究结果相近。试验得到焦煤的粉煤灰、煤矸石的起动风速与丛晓春等[23]相近，在粒径均值 <0.100 mm 时颗粒的起动风速随粒径均值的增大而减小，与试验结果相符。按照董治宝等[24]对不同粒度特征风成沙可蚀性的研究，粒径小于 0.05 mm 颗粒属难蚀颗粒，这部分粒级属于粉粒和黏粒，根据粒径累积曲线可得，粉粒和黏粒的累积含量焦煤 > 煤矸石、裸沙 > 壤质砂土，起动风速与结论相符。

以往实验中风蚀率随风速增加通常成几何级增长，对应的回归方程为幂函数或指数关系[25-26]。本试验煤矸石的风蚀率与风速呈指数函数关系，壤质砂土、粉煤灰、焦煤的风蚀率与风速呈幂函数关系。但试验采用的风速最大仅能达到 12 m · s^{-1}，裸沙起动风速较大，在试验风速范围内未呈现出明显的几何级增长趋势，裸沙的风蚀率与风速呈线性增长趋势。由于本研究中尘源物质种类差异较大，且受到试验风速、环境等因素影响，尘源物质的风蚀率与风速所呈现的函数关系具有差异。

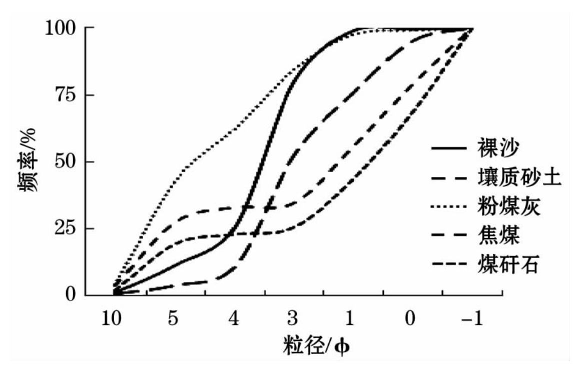


图 4 尘源物质粒径累积分布曲线

Fig. 4 Cumulative particle size distribution curve of dust source material

3.2 含水量对不同尘源物质风蚀的影响

含水率变化是影响尘源物质风蚀的重要因素，裸沙含水率的平方根与风蚀率呈线性关系，即在起动风速在低含水率时比高含水率增加明显，故在干旱沙漠地区即使有少量降雨，裸沙的风蚀便会立即停止[27]。刘贤万等[28]的实验结果表明，含水率对地表的风蚀具有明显的抑制作用，胡孟春等[29]通过风洞实验测定沙的含水率到达 2% 时，抗风蚀能力趋于稳定，本试验测得裸沙在含水率大于 1% 时风蚀率随含水率变化速度变缓，且当含水率达到 3% 时可抵御 6 ~ 7 级大风。早期 Azizov[30]实验发现，当含水率小于 4% 时，土壤水分对起动风速无明显的影响，而当含水率大于 4% 时，水分对起动风速的影响十分明显。本试验所用壤质砂土含水率在 2% ~ 4% 时受含水率影响不明显，而在含水率小于 2% 和大于 4% 时起动风速随含水率增加而明显增加。粉煤灰黏粒含量少，难以形成稳定的团粒和灰块，抗风蚀性较差，且粉煤灰表面吸热性强，蒸发强烈[31]，洒水抑尘效果差。丛晓春等[24]对煤粉颗粒实验表明，当含水率增加到 4% 时，起尘量明显减少。王建峰等[32]曾在水分对港口煤炭粉尘起动风速的影响研究中提出阈值含水率，各粒径范围内煤炭的含水率临界值在 5% ~ 8%，超过阈值前含水率对起动风速影响不明显，本试验测得焦煤、煤矸石含水率阈值均在该临界值范围内。

4 结 论

（1）5 种尘源物质的起动风速，裸沙最大，其次是壤质砂土、焦煤、煤矸石，粉煤灰最小，极易起尘。裸沙风蚀率随风速呈线性增长趋势（$R^2=0.99$），壤质砂土、粉煤灰、焦煤成幂函数增长趋势（$R^2>0.95$），煤矸石增长趋势接近于指数函数（$R^2=0.92$）。

（2）尘源物质的风蚀特征受到容重、粒径的影响，尘源物质结构相差较大情况下，容重小的物质更

易起动；尘源物质结构相近情况下，中值粒径较小、粉粒和黏粒分布频率高的尘源物质抗蚀性更大。

(3) 增大含水率可以抑制尘源物质风蚀，裸沙的起动风速与含水率增加呈正幂函数关系，含水率到达3%可以抵御较大风速；壤质砂土、粉煤灰分别在含水率1.46% ~4.16%、7.11% ~12.97%起动风速无明显变化，风蚀率与含水率呈负指数关系；焦煤在含水率大于5.93%时，起动风速随含水率增加迅速增大，含水率在4%左右可以抵御10 $m \cdot s^{-1}$以下风速风蚀；煤矸石起动风速与含水率呈正幂函数关系，接近饱和含水率时各试验风速下几乎不发生风蚀。

(4) 焦煤、煤矸石可采用洒水抑尘措施，含水率需高于阈值可有效抑尘；提高壤质砂土含水率对风蚀抑制效果不明显，沙区面积大且蒸发量大，壤质砂土、沙区可通过生物措施与工程措施布置防治措施，粉煤灰容重小、中值粒径小，对粉煤灰堆放产生粉尘污染防治可采用混合改良、化学抑尘剂等措施。

参考文献(References)：

[1] 赵廷宁，张玉秀，曹兵，等. 西北干旱荒漠区煤炭基地生态安全保障技术[J]. 水土保持学报，2018，32(1)：1－5. [Zhao Tingning，Zhang Yuxiu，Cao Bing，et al. Eco-security technology for coal mining bases in the Northwestern arid desert regions in China[J]. Journal of Soil and Water Conservation，2018，32(1)：1－5.]

[2] 王凤琴，赵旭春. 乌海市空气污染浓度预报初探[J]. 环境与发展，2012(4)：83－85. [Wang Fengqin，Zhao Xuchun. Prediction of air pollution concentration in Wuhai City[J]. Environment and Development，2012(4)：83－85.]

[3] 吴彩，生金林. 乌海矿区小煤窑开发问题的调查[J]. 内蒙古煤炭经济，1986(1)：5－7. [Wu Cai，Sheng Jinlin. Investigation on the development of small coal mines in Wuhai mining area[J]. Inner Mongolia Coal Economy，1986(1)：5－7.]

[4] 王镱潼，唐泽军，陈超，等. 内蒙库布齐沙漠表层固沙室内风洞模拟试验[J]. 中国环境科学，2017，37(8)：2888－2895. [Wang Yitong，Tang Zejun，Chen Chao，et al. Wind tunnel experimental study on desert surface of Kubuqi Desert，Inner Mongolia[J]. China Environmental Science，2017，37(8)：2888－2895.]

[5] 刘世增，徐先英，詹科杰. 风沙物理学进展及其在沙漠化防治中的应用[J]. 科技导报，2017，35(3)：29－36. [Liu Shizeng，Xu Xianying，Zhan Kejie. Advancing in study of the blown sand physics and its application in desertification control[J]. Science & Technology Review，2017，35(3)：29－36.]

[6] 移小勇，赵哈林，赵学勇，等. 不同风沙土含水量因子的抗风蚀性[J]. 土壤学报，2006，43(4)：684－687. [Yi Xiaoyong，Zhao Halin，Zhao Xueyong，et al. Erodibility of aeolian soils in moisture content[J]. Acta Pedologica Sinica，2006，43(4)：684－687.]

[7] 董治宝，钱广强. 关于土壤水分对风蚀起动风速影响研究的现状与问题[J]. 土壤学报，2007，44(5)：934－942. [Dong Zhibao，Qian Guangqiang. A review on effect of soil moisture on wind erosion threshold velocity[J]. Acta Pedologica Sinica，2007，44(5)：934－942.]

[8] 曹唯，徐明生. 煤堆和矸石山风蚀扬尘污染分析及防治简述[J]. 能源环境保护，1998(4)：33－36. [Cao Wei，Xu Mingsheng. Analysis and prevention of dust pollution caused by wind erosion of coal pile and Gangue hill [J]. China Academic Journal Electronic Publishing House，1998(4)：33－36.]

[9] 辜艳丹. 干旱半干旱地区土壤的粉尘释放研究[D]. 兰州：兰州大学，2009. [Gu Yandan. The Research of Dust Emission in Arid and Semi-Arid Soil[D]. Lanzhou：Lanzhou University，2009.]

[10] 蒙仲举，王猛，王淮亮，等. 基于数字成像技术的风蚀地表颗粒空间异质性[J]. 干旱区研究，2016，33(6)：1270－1277. [Meng Zhongju，Wang Meng，Wang Huailiang，et al. Spatial heterogenity of soil particles on wind erosion surface based on digital imaging technology[J]. Arid Zone Research，2016，33(6)：1270－1277.]

[11] Heywood H. The Physics of blown sand and desert dunes[J]. Nature，1941，148：167－187.

[12] 李宁，杜子璇，许英军，等. 土壤湿度与风速对沙尘暴发生的贡献程度分析[J]. 自然灾害学报，2007，16(4)：1－5. [Li Ning，Du Zixuan，Xu Yingjun，et al. A contribution of soil moisture and wind speed to occurrence of dust storms[J]. Journal of Natural Disasters，2007，16(4)：1－5.]

[13] 汪日生，周新华. 静态煤堆风蚀起尘机理及其粉尘扩散影响因素研究[J]. 世界科技研究与发展，2015，37(5)：514－518. [Wang Risheng，Zhou Xinhua. Researches on arising mechanism and influencing factors on diffusion of static coal pile dust with wind erosion[J]. World Sci-Tech R & D，2015，37(5)：514－518.]

[14] 苑依笑，王仁德，常春平，等. 风蚀作用下农田土壤细颗粒的粒度损失特征及其对土壤性质影响[J]. 水土保持学报，2018，32(2)：104－109，119. [Yuan Yixiao，Wang Rende，Chang Chunping，et al. Loss characteristics of fine particles by wind in farmland and its effect on soil properties[J]. Journal of Soil and Water Conservation，2018，32(2)：104－109，119.]

[15] 张春来，宋长青，王振亭，等. 土壤风蚀过程研究回顾与展望[J]. 地球科学进展，2018，33(1)：27－41. [Zhang Chunlai，Song Changqing，Wang Zhenting，et al. Review and prospect of the study on soil wind erosion process[J]. Advances in Earth Science，2018，33(1)：27－41.]

[16] 荣立明，张成梁，王妍，等. 乌海市露天煤矿生态环境现状分析及治理对策[J]. 内蒙古林业，2018(4)：21－23. [Rong Liming，

Zhang Chengliang, Wang Yan, et al. Analysis on the ecological environment of open-pit coal Mine in Wuhai City and countermeasures[J]. Journal of Inner Mongolia Forestry, 2018(4): 21 - 23.]

[17] 张永亮. 从乌海风口入手加速乌兰布和沙漠治理步伐[J]. 绿色中国, 2008(12): 40 - 42. [Zhang Yongliang. Accelerate the pace of Ulan Buh Desert control from the draught of Wuhai[J]. Green China, 2008(12): 40 - 42.]

[18] 陈钢, 兰石, 田犀. 矿山开采对区域大气环境影响的分析[J]. 露天采矿技术, 2008(6): 70 - 71, 89. [Chen Gang, Lan Shi, Tian Xi. Analysis of mining influence on region atmospheric enviroment[J]. Opencast Mining Technology, 2008(6): 70 - 71, 89.]

[19] 张惜伟, 汪季, 高永, 等. 呼伦贝尔沙质草原风蚀坑表层土壤粒度特征[J]. 干旱区研究, 2017, 34(2): 293 - 299. [Zhang Xiwei, Wang Ji, Gao Yong, et al. Grain size characteristics of topsoil in blowouts on sandy grasslands in Hulun Buir[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(2): 293 - 299.]

[20] 王云超, 张立峰, 侯大山, 等. 河北坝上农牧交错区不同下垫面土壤风蚀特征研究[J]. 中国农学通报, 2006, 22(8): 565 - 568. [Wang Yunchao, Zhang Lifeng, Hou Dashan, et al. Study on soil wind erosion of different underlying in Ecotone between agriculture and animal husbandry in Bashang of Hebei[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(8): 565 - 568.]

[21] 杨具瑞, 方铎, 毕慈芬, 等. 非均匀风沙起动规律研究[J]. 中国沙漠, 2004, 24(2): 248 - 251. [Yang Jurui, Fang Duo, Bi Cifen, et al. Initiation thresholds of non-uniform blown sand[J]. Journal of Desert Research, 2004, 24(2): 248 - 251.]

[22] Cabrejos F J, Klinzing G E. Pickup and saltation mechanisms of solid particles in horizontal pneumatic transport[J]. Powder Technology, 1994, 79(2): 173 - 186.

[23] 丛晓春, 张旭. 矿料颗粒起动风速的实验[J]. 中国矿业, 2003, 12(9): 32 - 34. [Cong Xiaochun, Zhang Xu. Experimental research on the threshold velocity of raw ore particles[J]. China Mining Magazine, 2003, 12(9): 32 - 34.]

[24] 董治宝, 李振山. 风成沙粒度特征对其风蚀可蚀性的影响[J]. 水土保持学报, 1998, 4(4): 1 - 5. [Dong Zhibao, Li Zhenshan. Wind erodibility of aeolian sand as influenced by grain-size parameters[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1998, 4(4): 1 - 5.]

[25] Li Xiaoyan, Liu Lianyou, Wang Jianhua. Wind tunnel simulation of aeolian sandy soil erodibility under human disturbance[J]. Geomorphology, 2004, 59(1 - 4): 3 - 11.

[26] Zou Xueyong, Wang Zhoulong, Hao Qingzhen, et al. The distribution of velocity and energy of saltating grains in a wind tunnel[J]. Geomorphology, 2001, 36(3 - 4): 155 - 165.

[27] 刘小平, 董治宝. 湿沙的风蚀起动风速实验研究[J]. 水土保持通报, 2002, 22(2): 1 - 4, 61. [Liu Xiaoping, Dong Zhibao. Wind threshold shear velocities of sands at moistened state[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2002, 22(2): 1 - 4, 61.]

[28] 刘贤万. 颗粒运动及其数理简析[J]. 中国沙漠, 1993, 13(2): 1 - 8. [Liu Xianwan. The mathematical-physical analysis on particle movement[J]. Journal of Desert Research, 1993, 13(2): 1 - 8.]

[29] 胡孟春, 刘玉章, 乌兰, 等. 科尔沁沙地土壤风蚀的风洞实验研究[J]. 中国沙漠, 1991, 11(1): 22 - 29. [Hu Mengchun, Liu Yuzhang, Wu Lan, et al. A experimental study in wind tunnel on wind erosion of soil in Korqin Sandy Land[J]. Journal of Desert Research, 1991, 11(1): 22 - 29.]

[30] Azizov A. Influence of soil moisture on the resistance of soil to wind erosion[J]. Soviet Soil Science, 1977, 1: 102 - 105.

[31] 严平, 郭志中, 王继, 等. 永昌电厂粉煤灰危害及其综合治理[J]. 中国沙漠, 1996, 16(1): 32 - 36. [Yan Ping, Guo Zhizhong, Wang Ji, et al. Damages of coal ash and its comprehensive improvement from Youngchang power plant in Gansu Province[J]. Journal of Desert Research, 1996, 16(1): 32 - 36.]

[32] 王建峰, 马兰, 詹水芬, 等. 水分对港口煤炭粉尘起动风速的影响研究[J]. 水道港口, 2009, 30(3): 209 - 212. [Wang Jianfeng, Ma Lan, Zhan Shuifen, et al. Effects of moisture on threshold velocity of coal dust[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2009, 30(3): 209 - 212.]

Study on the wind erosion characteristics of several typical dust source materials in the Wuhai mining area

LI Yu-ke[1], XIN Zhi-ming[2], XIAO Hui-jie[1], ZHANG Ming-hao[1], LU Si-qi[1], WANG Lu[1]

(1. *Beijing Forestry University School of Soil and Water Conservation, Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Combating Desertification Ministry of Education*, 100083 *Beijing, China*;

2. *Chinese Academy of Forestry Sciences Desert Forestry Experimental Center, Dengkou* 015200, *Inner Mongolia, China*)

Abstract: Sand dust pollution is one of the most serious environmental issues in the Wuhai mining area of Inner Mongolia. Measuring the threshold velocity of typical dust source materials in this area plays an important role in studying the near-surface sediment transport rate, soil wind erosion prediction, and dust weather forecasts. Samples of five kinds of typical dust source materials, including loamy sand soil, bare sand, fly ash, coking coal, and coal gangue, were collected. The threshold velocity and wind erosion rate of each dust source material were then determined using a wind tunnel experiment, and physical properties, such as bulk density and particle size distribution of the dust source materials were measured. In addition, the effects of various factors on threshold velocity and wind erosion rates were analyzed, and the relationship between moisture content variation and wind erosion characteristics was examined. The results showed that the threshold velocity of dust source materials was bare sand > loamy sandy soil > coking coal > gangue > fly ash. This shows a linear growth trend with the wind speed and wind erosion rate of bare sand. The wind erosion rate of loamy, sandy soil, fly ash, and coking coal were found following a positive power relationship with wind speed, while the wind erosion rate of coal gangue is close to the exponential function with wind speed. When the particle size composition of dust source substances varied greatly, lighter substances were easier to start. When the particle size composition of dust source substances was similar, the corrosion resistance of materials with small median particle size distribution and high frequency of corrosion-resistant particles was greater. There was a positive power relationship between the threshold velocity of bare sand, coking coal, gangue, and water content. When the moisture content of loamy sand and fly ash was 2% –4% and 1.46% –4.16%, the threshold velocity showed no evident change. The water threshold of bare sand, coking coal, and gangue was about 3%, 4%, and saturated water content, respectively, and the wind erosion rate of loamy sand and fly ash showed a negative exponential relationship with water content. Coking coal and coal gangue inhibited wind erosion by increasing water content. Thus, control measures should be suitably arranged in combination with the relationship between the environment and influencing factors for bare sand, loamy sand, and fly ash. The results of this study reflect the wind erosion characteristics of the five dust source materials and their relationship with wind speed, bulk density, particle size distribution, and water content, which can provide a theoretical basis for sand-and-dust control measures and ecological restoration research in this area.

Key words: threshold velocity; wind erosion rate; bulk density; particle size; moisture content; Wuhai mining area